

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra výrobních strojů a konstruování

Třiosý pálicí automat

3-axis Cutting Machine

Student:  
Vedoucí diplomové práce:

Bc. Vít Tiefenbach  
**doc. Ing. Jiří Fries, Ph.D.**

Ostrava 2010

## **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě .....

.....

Vít Tiefenbach

### Prohlašuji, že

- Byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :.....

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

TIEFENBACH, V. Třiosý pálicí automat. Ostrava: katedra Výrobních strojů a konstruování, Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2010, 56s. Diplomová práce, vedoucí Fries, J.

Diplomová práce se zabývá návrhem stroje, osazeného plazmovým hořákem k dělení plechů vysokoenergetickým plazmovým paprskem, určeným k tvarovému dělení plechů do tloušťky 30 mm v ose X a Y. V úvodní části jsou popsány hlavní části podobných strojů, dále přehledně seřazeny možnosti a principy takovýchto výrobních strojů, a popis technologie plazmového paprsku. Na základě přehledů je navrhnout prototyp obdobného stroje. V další části jsou rozbor a pevnostní kontrolní výpočty jednotlivých dílů. V příloze práce jsou pevnostní výpočty ozubení, a vybrané sestavné výkresy a výkresy součástí.

## ANOTATION OF THESIS

TIEFENBACH, V. 3-axis Cutting Machine. Ostrava : Department Design of Machines and Equipment , Faculty of mechanical engineering VŠB-Technical univerzity of Ostrava, 2010, 56 pages. Thesis, head: Fries, J.

The diploma thesis is dealing about 3-axis plasma cutting machine, which can move torch horizontally on plate in X,Y axis and can elevace torch to axis Z, which can be used to cut metal sheets up 30 mm of thickness. The introduction is about principles and possibilities of these machines. On the basis of approaches is done the main project.

In next parts of this thesis are analysis and solid check calculations of separate parts. In appendix is gear solid check caluculations, choosen production sheet and drawings of solution.

## Seznam použitých veličin

<u>Zkratka</u>	<u>Název</u>	<u>Jednotka</u>
<b>a</b>	zrychlení	$\text{m.s}^{-2}$
<b>a<sub>z</sub></b>	zrychlení	$\text{m.s}^{-2}$
<b>B</b>	průměr hřídele motoru	mm
<b>d</b>	patní průměr kola	mm
<b>d<sub>0</sub></b>	roztečný průměr kola	mm
<b>d<sub>k</sub></b>	hlavový průměr kola	mm
<b>d<sub>y</sub></b>	roztečný průměr kola osy Y, X	mm
<b>E</b>	šířka ozubení	mm
<b>F<sub>x</sub></b>	síla	N
<b>F<sub>y</sub></b>	síla	N
<b>F<sub>MZ</sub></b>	síla	N
<b>g</b>	gravitační zrychlení	$\text{m.s}^{-2}$
<b>G<sub>v</sub></b>	gravitační síla vozíku	N
<b>G<sub>p</sub></b>	gravitační síla portálu	N
<b>G<sub>z</sub></b>	gravitační síla osy Z	N
<b>I<sub>rZ</sub></b>	statický moment setrvačnosti v ose Z	$\text{g.cm}^2$
<b>I<sub>rY</sub></b>	statický moment setrvačnosti v ose Y	$\text{g.cm}^2$
<b>I<sub>rX</sub></b>	statický moment setrvačnosti v ose X	$\text{g.cm}^2$
<b>I<sub>MZ</sub></b>	odebíraný proud v záběru motoru Z	A
<b>I<sub>MY</sub></b>	odebíraný proud v záběru motoru Y	A
<b>I<sub>MX</sub></b>	odebíraný proud v záběru motoru X	A
<b>k</b>	koeficient valení	-
<b>k<sub>v</sub></b>	koeficient bezpečnosti	-
<b>L</b>	délka hřebenu	m
<b>m</b>	modul	mm
<b>m<sub>h</sub></b>	hmotnost hořáku	kg
<b>m<sub>mX</sub></b>	hmotnost motoru X	kg
<b>m<sub>mY</sub></b>	hmotnost motoru Y	kg
<b>m<sub>mZ</sub></b>	hmotnost motoru Z	kg
<b>m<sub>p</sub></b>	hmotnost portálu	kg
<b>m<sub>plechu</sub></b>	hmotnost plechu	kg
<b>m<sub>z</sub></b>	hmotnost osy Z	kg
<b>M<sub>x</sub></b>	dovolený moment na vedení	N.m
<b>M<sub>y</sub></b>	dovolený moment na vedení	N.m
<b>M<sub>z</sub></b>	dovolený moment na vedení	N.m
<b>M<sub>Mx</sub></b>	moment na motoru X	N.m
<b>M<sub>mx</sub></b>	vypočítaný moment na motoru X	N.m
<b>M<sub>My</sub></b>	moment na motoru Y	N.m
<b>M<sub>Mz</sub></b>	moment na motoru Z	N.m
<b>M<sub>zx</sub></b>	ohybový moment na vedení	N.m
<b>M<sub>yz</sub></b>	ohybový moment na vedení	N.m
<b>M<sub>yy</sub></b>	ohybový moment na vedení	N.m
<b>M<sub>zy</sub></b>	ohybový moment na vedení	N.m
<b>V</b>	objem plechu	$\text{m}^3$
<b>x</b>	vzdálenost těžiště v ose Z	mm
<b>X</b>	osa	-

<b>Y</b>	osa	-
<b>Z</b>	osa	-
<b>z</b>	počet zubů	-
$\rho_{\text{ocel}}$	hustota oceli	kg. m <sup>-3</sup>

## **Poděkování**

Za pomoc a podporu při psaní této diplomové práce děkuji především vedení Katedry výrobních strojů a konstruování, jmenovitě doc. Jiřímu Friesovi.

Zvláště pak vyjadřuji velké díky panu Martinovi Novákovi, za finanční podporu projektu a důvěru, kterou do mě vložil.

Vít Tiefenbach

## Obsah diplomové práce :

1.	Úvod	9
2.	Rozbor plazmového pálicího automatu	10
3.	Přehled řezacích automatů	14
3.1	Rozdělení dle metody dělení	14
3.2	Rozdělení dle konstrukce portálu	17
3.3	Rozdělení dle velikosti	19
4.	Popis technologie plazmového dělení materiálů	25
4.1	Co je to plazma?	25
4.2	Popis principu řezu plazmou	26
4.3	Komponenty systému plazmového dělicího zařízení	26
4.4	Volba plynů	28
5.	Ovládání stroje	30
5.1	Řídící systém	30
5.2	Bezpečnost	31
5.3	Před uvedením do provozu	32
5.4	Mazání	32
5.5	Čištění	32
5.6	Zvýšení životnosti	32
5.7	Uvedení do provozu	33
6.	Návrh zařízení	34
6.1	Výběr materiálu konstrukce	34
6.2	Výběr hnacího ústrojí	35
6.3	Návrh osy Z	37
6.4	Návrh osy Y	42
6.5	Návrh osy X	46
6.6	Výpočet nosníku portálu metodou konečných prvků (MKP)	49
6.7	Určení velikosti mříže – roštu stolu	50
6.8	Návrh terminálu	51
7.	Závěr	53
8.	Použitá literatura	54
9.	Seznam příloh	56



# 1. Úvod

Ve výrobě téměř všech moderních strojů je použito mnoho polotovarů z plechů, někdy i přímo strojních součástí vyráběných metodou vyřezávání z plechových tabulí. Tyto metody nepatří sice mezi ekonomicky nejvýhodnější pro velkosériovou výrobu, a nemohou v ceně a rychlosti konkurovat takovým metodám jako je stříhání a tažení, avšak praxe ukázala vysokou potřebu automatických řezacích sestav určených k dělení (řezání) i velmi silných plechů. Plechové polotovary – výpalky mohou být následně např. ohýbány, ohraňovány, lakovány. Mezi takovéto patří nejrozličnější plechové kryty, víka, vzpěry, žebra, části převodových skříní, výložníky a ramena zemních strojů, prvky chassis apod.

Rozdíl mezi ručním tvarovým vyřezáváním např. kyslík-acetylenovým plamenem a automatickým strojním vyřezáváním tím samým plamenem je velmi vysoký. V první řadě je nutné uvést větší výkon ve prospěch automatu – dělí silnější plechy. Automat přináší řadu výhod – produktivitu, přesnost, úsporu plynů (energií), s vhodnou údržbou může pracovat nepřetržitě. Obdobný přínos výhod lze očekávat od automatického plazmového automatu, kde však není obvyklý přechod z ručního plazmového dělení. Ruční plazmové slouží ke zvláštním účelům.

Cílem této práce je provést návrh, kterému bude následovat sestavení prototypového kusu, zvolit variantu a navrhnout stroj, který bude možné sestavit co nejjednodušeji. Stroj má mít v budoucnu možnost rozšířit výrobu na celkem 3 typové modely, velikostně adekvátní výrobní škále formátů plechů. Tyto mají mít co nejvíce společně zaměnitelných dílů.

Konstrukce, a všeobecně záměr stavby tohoto stroje má dbát na nízkou cenu, snadnou údržbu a servisovatelnost stroje přímo zákazníkem. Idea projektu je taková, že zákazník má možnost zakoupit celý stroj včetně řídicí elektroniky a softwaru, anebo pouze elektroniku a vybrané části. Tak jako tak, obdrží celou dokumentaci, s jejíž pomocí je schopen si sám opatřit náhradní díly, eventuelně postavit celý pálicí automat vlastními prostředky po mechanické stránce. Tímto využije svých pracovních sil, a ušetří část výrobních nákladů, avšak stroj musí být osazen a kalibrován tvůrcem elektroniky. Know-how tohoto stroje je právě elektronická část se softwarem.

## **2. Rozbor plazmového pálicího automatu**

Každý pálicí automat se skládá z několika základních částí, na které máme nejrůznější požadavky. Hlavním konstrukčním celkem je nosný portál, nesoucí pálicí trysku, umožňující pohyb trysky ve 3 osách. Dále pak stůl – na ten pokládáme plechy, plazmový agregát – dodává plazmující plyn a je zdrojem pro elektrický oblouk. Poslední částí je ovládací terminál, v němž je zabudován řídicí počítač. Na nich jsou závislé ostatní celky – pohony posuvů, jejich realizace, podpěrné nohy stolu, odsávání karcinogenních spalin kovů, atd.

Průmyslové automaty bývají vybaveny elektrickým pohonem, jsou řízeny počítačem, a jsou určeny do oblasti technologie tvarového dělení plošných materiálů v kterémkoliv místě pracovní plochy. Předností počítačů je jednoduchost zadání základních vstupních údajů - tvar je výstupem CAD aplikace a počítačem je automaticky zpracován a automaticky vypálen.

Mnoho výrobců dodává stroje formou "na klíč". V kombinaci s plazmovými zdroji pro strojní řezání, od různých světových výrobců, jsou automaty předpokladem vysoké kvality a přesnosti řezu, produktivity práce, nízkých provozních nákladů a rychlé návratnosti investice. Pálicí automaty lze také osadit kyslík-palivo hořáky, nebo variantou kombinovanou, kdy na jednom vozíku je umístěn jeden hořák v pohotovostní poloze a druhý hořák je umístěn v parkovací poloze, pro změnu typu pálení pak stačí jen hořáky zaměnit.

Elektroinstalace na těchto strojích je velmi namáhána – kabely se při každém pohybu ohýbají, a proto musí být použity kabely speciální, uloženy do energetických řetězců.

### *Portál*

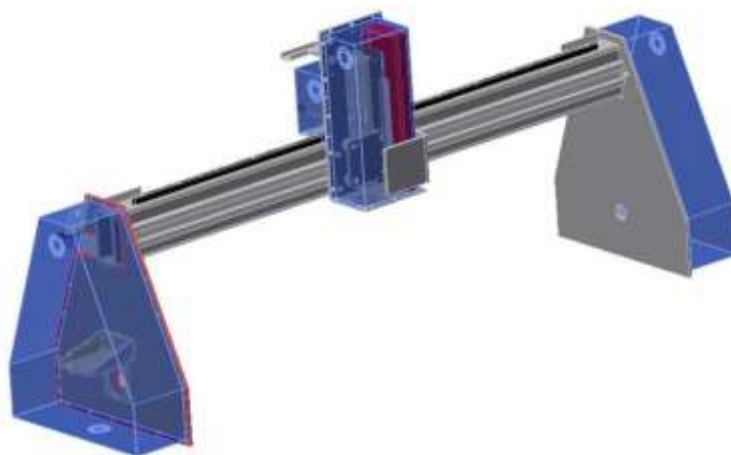
Portály pálicích automatů bývají osazeny různými pohony, na které klademe široké nároky. Můžou to být nároky na dynamiku provozu, bezhlučnost, nízké vůle, snadná údržba (levná) a další, často nesklobitelné vlastnosti.

Musíme mít na paměti, že zařízení bude pracovat v prostředí, kde vlivem sublimace kovů (proces dělení materiálu) vzniká velice abrazivní kovový prach, který ulpívá na všech

částech pohonů, a způsobuje jejich nadměrné opotřebení, obzvláště lineárních vedení atd. Jakékoli použití lubrikantů z výše uvedeného důvodu je nemožné, vznikla by funkční obdoba brusné pasty.

Portály z hlediska výšky rozlišujeme na:

- lehké a nízké  
*pro pálení tenkých plechů laserem*
- střední  
*pro pálení středních plechů plasmou*
- pevné a vysoké  
*pro pálení tlustých plechů technickými plyny*



*Obr. 2.1 Portál*

### *Pohony*

Až na výjimky je nutné vždy převodovat otáčky a moment na hřídeli pohonu na lineární – suvný pohyb. K tomuto se používají ozubené hřebeny, ale také jiná řešení, např. ozubené pryžové řemeny. Z důvodu plynulosti řízení je nutné použít krokové motory.

Zmiňovanou výjimku tvoří použití lineárního motoru.

### *Stůl*

Je pracovním prostorem, na kterém dochází k samotnému dělení materiálu. Stůl musí unést váhu děleného plechu a portálu. Vrchní „pracovní desku“ tvoří rošt, různého tvaru

a provedení. Rošt stolu musí mít dostatek prostoru k tepelné dilataci materiálu, a je nutné, aby byl snadno měnitelný – při řezání dochází k jeho poškozování plazmovým paprskem. Obvykle stůl bývá vybaven zařízením pro odsávání spalin (nejčastěji řešeno RV ventilátorem). Stoly se liší jednak velikostí pracovní plochy, nosností, ale také provedením ukotvení nohou pod pojezdovými koleji (na stůl, mimo stůl - do podlahy). Stoly mohou být vybaveny výsuvnými šuplaty pro odpad z řezu.



*Obr. 2.2 Detail pohonu [3]*

### *Terminál*

K pálicím automatům jsou nutné výkonné řídicí jednotky, které jsou uloženy v obslužném stolku, terminálu. Ten může obsahovat i úložné prostory pro potřebu paliče. Vysoký výpočetní výkon elektroniky je nutný kvůli dynamice a přesnosti polohování. Řídicí systém obvykle umožňuje přesný pohyb v osách X,Y podle naprogramované trajektorie, umožňuje automatické zapalování a zhášení, ruční zapalování a zhášení, dovoluje spustit chod zpět (v případě propálení řezací trysky, apod.), umožňuje okamžité zastavení v případě poruchy. Pohyb hořáku (osy Z) by mělo být možné ovládat také ručním řízením (např. pro rozřezání zbytků tabule plechu po pálení z důvodu lehčí manipulace).

Řídicí systém by měl mít v sobě zabudované automatické hlídání výšky hořáku nad materiálem a umožňovat plynule měnit rychlost pálení i během procesu pálení a provádět výpočet kompenzace řezné spáry.

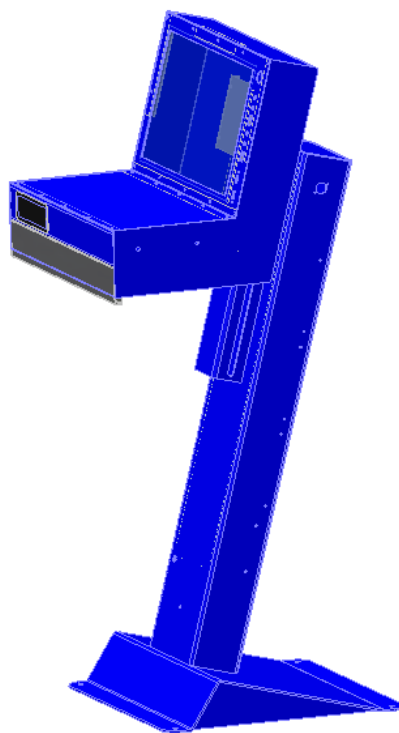
### *Podpěrné nohy*

Podpěrné nohy mohou být součástí stolu. Udrží stálou vodorovnou polohu stroje. Místo podpěrných nohou může být stroj vybaven podpěrnými koleji.

### *Pálicí agregát a hořák*

Agregát je výkonný zdroj elektrické energie, a zároveň zařízením, které dodává plyn. Podle typu soustavy může tímto plynem být např. stlačený vzduch nebo kyslík.

Hořák může být polohovatelný, ovládaný servomotory, ten je potom používán k přesnému úkosování plechů.



*Obr. 2.3 Terminál*

### **3. Přehled řezacích automatů**

V České republice je k mání velké množství automatů nejrůznějších velikostí, výkonů a konstrukčních řešení. Můžeme koupit zařízení české výroby, ale většina se jich dováží ze zahraničí, a těm je mnohdy těžko cenově konkurovat, resp. konkurovat jejich stupni zpracování. Mezi technologicky nejúspěšnější patří výrobky firem, resp. jejich divizí: Messer Cutting & Welding, ESAB Cutting Systems, STIGAL, KOMATSU, DURMAZLAR. Z českých firem pak jen MGM Tábor.

Nejdražší a největší z nabízených pálicích automatů jsou určené pro řezání tabulí plechu šíře 14metrů a neomezené délky (ESAB Avanger), jsou často konstruovány s portálem osazeným několika systémy dělení, např. laser / plasma / kyslík. Cílem této kapitoly je vytvořit ucelený přehled zařízení k dělení plechu, a to rozdělením dle metody dělení, dle konstrukce portálu a podle velikosti.

Přesto, že se v této kapitole snažím o co nejobektivnější shrnutí trhu, je jasné, že ne všechny firmy vyrábějící plasmové automaty jsou v této kapitole zmíněny. Zdrojem poznání jednotlivých značek a částečně výrobků byl Mezinárodní strojírenský veletrh v Brně ročník 2008 a ročník 2009, a samozřejmě internet. Firmám, které jsem v tomto přehledu nechtěně vynechal, se upřímně omlouvám.

#### **3.1 Rozdělení dle metody dělení**

V podstatě, všechny procesy řezání kovů, které můžeme najít na trhu, spadají do jedné z kategorií. Zvolená metoda dělení kovů je hlavním ovlivňujícím faktorem pro tvar řezu a jeho přesnost. V přehledu uvádím nejčastější řešení, se kterými je možno se běžně setkat.

- *chemické*

Chemické dělení kovů chápeme jako oxidační reakci kovu vyvolanou směsí kyslík-palivo. Řezným médiem je pouze kyslík, palivo představuje zdroj prvotního vneseného tepla. Řezání kyslíkem představuje spalovací proces, čili jde přímou chemickou reakcí. Proud kyslíku spaluje kov v úzkém úseku, provádí tak řez a proud plynů odstraňuje produkty spalování (strusku) z místa řezu. Pro maximální rychlost řezání má rozhodující

význam čistota použitého kyslíku. Použitím kyslíku o vysoké čistotě se dosahuje vysoké produktivity.

Dříve než může řezání začít, musí být ocel předehřáta na zápalnou teplotu. Toto předehřátí zajistí plamen vytvořeným kyslíkem a hořlavým plynem. Volba hořlavého plynu ovlivňuje proces řezání z hlediska kvality, doby předehřevu a tloušťky materiálu, který lze s dobrými výsledky řezat.

Nejvhodnějším hořlavým plynem pro použití v pálicích automatech je bezesporu acetylen. Při rozpalování tenčích plechů se sníženými požadavky na kvalitu řezu lze s výhodou nízké ceny použít propan-butan. Nutno poznamenat že prvky soustav nejsou zaměnitelné (tryska, hořák, reduktor tlaku).

#### *- termické*

Termické dělení bývá v různých zdrojích chápáno jako dělení za použití vneseného tepla. V této stati však slovem „termické“ rozumíme dělení plazmou, která nevyužívá ani kyslík ani vzduch, čili nedochází k chemické reakci kovu, jen k odtavení. Plyny, používané v termických plasmových automatech jsou argon, vodík, dusík a jejich směsi. Mezi tyto zařízení patří plasmové automaty pro řezání pod vodní hladinou, nebo automaty osazené laserovým paprskem.

#### *- mechanické*

V uceleném přehledu nelze vynechat mechanické dělení plechů, přestože je technologicky úzce specifické a většinou se ostatním zařízením zde zmíněným nepodobá v žádném směru.

Pro mechanické dělení jsou obvyklé tyto technologické operace:

- řezání
- děrování
- vystřihování
- stříhání

Do mechanického dělení však spadá ještě jedna specifická metoda, a tou je abrazivní vodní paprsek. Abrazivní vodní paprsek se odlišuje od vodního paprsku v několika směrech. U „čistého“ vodního paprsku proud vody nahlodává materiál. U abrazivního vodního paprsku slouží vodní paprsek k urychlování abrazivních částic, které rozrušují materiál.

Brusná síla abrazivního vodního paprsku je stokrát ne-li tisíckrát silnější, než erozivní síla čistého vodního paprsku. Oba způsoby dělení vodním paprskem mají své uplatnění. Zatímco vodní paprsek je vhodný na řezání měkkých materiálů, nachází abrazivní paprsek uplatnění pro řezání tvrdých materiálů, jako jsou kovy, kámen, keramika, kompozity a podobně.

Abrazivní vodní paprsek je velmi všestranná technologie, při které nevznikají tepelně ovlivněné zóny řezu, a tím pádem nevznikají mechanická pnutí. Podobně jako jiné metody, je snadno programovatelný (CNC). Tenká řezná spára (od 0,3 do 1,35mm dle průměru paprsku) přispívá přesné geometrii řezaných dílů a umožňuje řezání tenkých materiálů při malých ztrátách materiálu v důsledku řezání. Méně obvykle se používá při řezání tlustých materiálů až do 250mm u standardních strojů. Nevýhodou je nízká postupová rychlost. Vodní paprsek též umožňuje řezání ve více vrstvách – paketech. Protože se jedná o mechanické řezání, lze určit řezné síly, ty se obvykle pohybují pod 500 N v průběhu řezání. Další výhodou je jeden řezný nástroj pro všechny materiály a snadné přepnutí z jediné na více řezných hlav. Tato technologie řezu má malý nebo žádný ořep – to podle řezaného materiálu.

#### *- termo-chemické*

Termicko-chemický proces dělení kovů chápeme jako kombinaci oxidace kovu vzduchem či kyslíkem a termického dělení plasmou. Právě tuto metodu využívá většina strojů k řezání uhlíkových a nízkolegovaných ocelí.

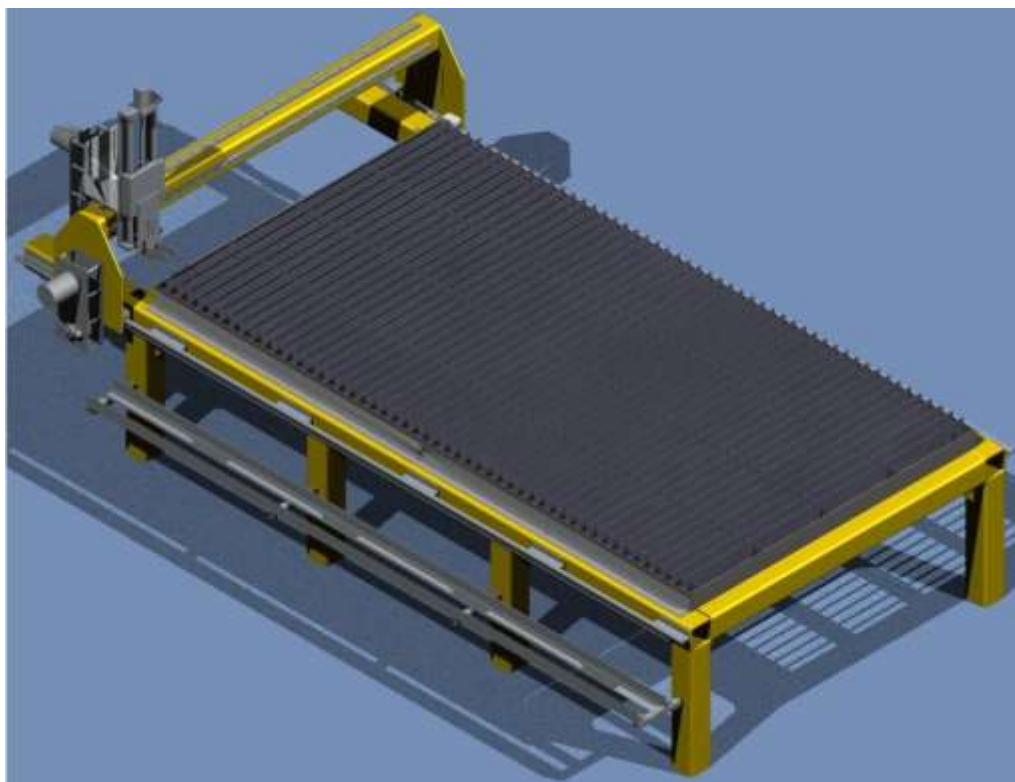
V dnešní době metody termochemického dělení kovových materiálů získávají na oblibě a postupně vytlačují nyní nejoblíbenější procesy chemické.



### **3.2 Rozdělení dle konstrukce portálu**

*- portál je nesen stolem (Obr. 3.1)*

Tyto pálicí sestavy patří mezi nejrozšířenější. Hořák je nesen mechanismem portálu, který je uchycen na pálicím stole. Toto řešení je kompaktní, neumožňuje bohužel pálení těch největších formátů plechů. Zařízení této konstrukce se lehko ustavují do pracovní polohy, jsou lehce přepravitelné a mohou být uvedeny do provozu za velice krátkou dobu. Toto řešení je obvyklé u soupravy, která je vybavena laserem, či plasmou o nižším výkonu (plechy do maximální tloušťky 20-30 mm).



*Obr. 3.1 Model portálu v parkovací poloze neseného stolem*

*- portál není nesen stolem (Obr.3.2)*

Pro největší formáty plechů je nutné použít kolejové vedení vlevo a vpravo podél stolu. Tohoto řešení se využívá u velkých kyslík-acetylenových souprav k řezání velmi silných plechů. Portál je nesen dvěma kolejnicemi, které musí být dokonale ustaveny. Mezi kolejnicemi je umístěn stůl, nad kterým se pohybuje hořák, nesen portálem. Tento je opět nutné ustavit.

Zde zmíněné konstrukční řešení je výhodné pro vysokou produktivitu práce. S výpalky z tlustých plechů nelze manipulovat ručně, potom po vyjetí portálu do parkovací polohy lze vhodným manipulačním zařízením (např. vysokozdvizným vozíkem) vyměnit třeba i celé stoly s výpalky, za nové. Tímto se dosahuje zvýšené produktivity dělicího stroje. Tyto velké a široké portály umožňují instalaci několika technologií dělení – obvyklé jsou kombinace autogenního řezání, laseru, plasmu, vyvrtávání, značení plechů apod.



*Obr. 3.2 Kolejový portál osazený dvěma technologiemi dělení*

*- zvláštní portál*

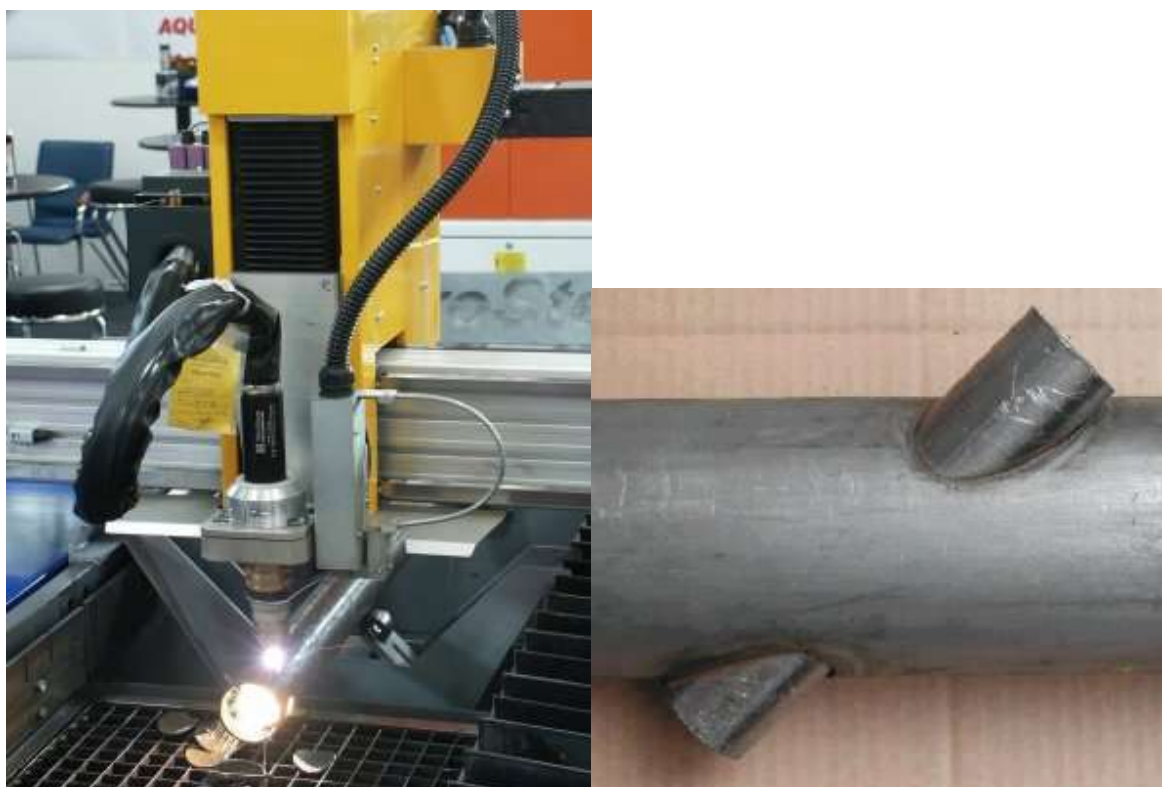
Pod toto označení zahrnuji méně obvyklé řešení dělicích automatů. Mezi tyto bezesporu patří zařízení, kde je portál vetknut do „nosné stěny“ umístěné na straně stolu. Takto jsou konstruovány automaty pro CNC řezy vodním paprskem firmy FLOW, model MACH 3.

Jiný případ „zvláštního“ konstrukčního řešení portálu je například robotické rameno. Ovšem stejně jako s vetknutým portálem se pravděpodobně při dělení plechů nesetkáme, protože tyto systémy jsou určeny pro speciální aplikace.



*Obr. 3.3 „Vetknutý“ portál stroje Mach3 firmy Flow [4]*

Dalším představitelem portálů zvláštní konstrukce jsou portály určené k tvarovému dělení trubek. Tvarově nadělené trubky jsou využívány zejména ve vzduchotechnice.



*Obr. 3.4 Zařízení AWAC k tvarovému dělení trubek [1]*

### **3.3 Rozdělení dle velikosti**

Rozdělení strojů dle velikosti je subjektivním názorem, při kterém jsem se snažil být maximálně objektivní.

Někteří výrobci dělají stroje např. jen velké stroje, nebo naopak jen malé, a podle jejich výrobního sortimentu je označují přídavnými jmény malé, resp. velké. Příkladem budiž fa FastCut CNC, jejichž „velké“ stroje je nutné s přihlédnutím ke konkurenčním strojům považovat za střední. Opačným příkladem je ESAB Cutting, kde „střední“ stroje dle katalogu nemohou být v rámci svojí velikosti zařazeny jinde než velké („středně velký stroj Sabre“ je velký až 4,5x7m!).

*- malé stroje*

Malé stroje jsou určeny k pálení velmi malých plechů, od velikosti 4x4 stopy (odpovídá 1,2x1,2m). Největší z těchto malých strojů odpovídá velikosti plechu 5x10 stop (1,5m x 3m), což se prolíná s nejmenšími zástupci středních strojů. Tyto stroje jsou rozšířeny v různých odvětvích průmyslu, mimo jiné i v reklamních agenturách. Tyto stroje najdou využití též v prototypové výrobě.



*Obr. 3.5 Stigal STIG 1500+ [15]*

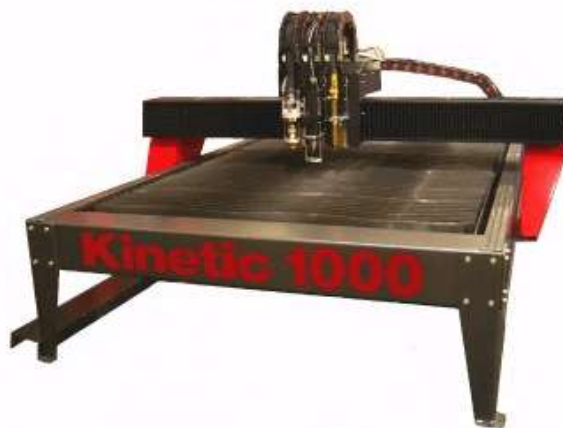


*Obr. 3.6 FastCut CNC Icon s detailem konstrukce uchycení hořáku [3]*



Malé stroje bývají konstruovány z profilů ze slitin hliníku, způsobem, který umožňuje pozdější rozšiřování například k CNC řezům dřeva, plastů, hliníku a dalších. Pokud jde o pálení plasmou, maximální šíře plechu může být 10-12mm při rychlosti asi 0,8 m/s.

Za typického představitele této třídy můžeme považovat stroj americké firmy FastCutCNC Icon. Cena tohoto stroje k 20.4.2010 činí 16 000 USD (zdroj eBay). Dalším zástupcem je např. Kinetic K1000 Machine, nebo Kinetic K1200 Machine nebo Stigal Stig 1500+.



*Obr. 3.7 Kinetic 1000 [6]*

*- střední stroje*

U strojů střední velikosti si povšimneme stolu robustnější konstrukce, kde hliníkové slitiny vytlačuje profilovaná konstrukční ocel. Stroje jsou určeny pro dělení plechu do tloušťky 20-30 mm a formáty tabulí od 1500 x 3000 mm do asi 3800 x 6300 mm. Tyto stroje mohou být vybaveny více tryskami, ale je to méně obvyklé.



*Obr. 3.8 Stigal Dynamic 1500 [15]*



*Obr. 3.9 shora: FastCut CNC G6Fabricator [3], Kinetic 2000[6], Messer Metalmaster[13], ESAB Acer DX[2]*

Mezi zástupce této třídy patří ESAB Acer DX, Messer MetalMaster, G6Fabricator firmy FastCut CNC, Kinetic K2000, Kinetic K2500, Stigal DYNAMIC, všechny stroje KOMATSU a dále větší stroje řady Arrow od MGM Tábor.

- velké stroje

Velké stroje jsou svou konstrukcí přímo určeny pro velké strojírenské výrobní společnosti. Tyto stroje patří k nejproduktivnějším a nejsilnějším. Dokážou dělit ty nejsilnější plechy, portály bývají osazeny několika technologiemi dělení, téměř vždy osazeny zařízením pro řezání plamenem kyslík-palivo, a plazmovými hořáky. Dále mohou být osazeny technologiemi pro vrtání, značkování, laserové řezání, a také některé mají možnost řezání pod plasmou pod vodou (určité úpravy pracovního stolu).

Tab. 3.1 Zástupci třídy velké stroje

<b>výrobce</b>	<b>řada</b>	<b>Určeno pro:</b>	<b>osaditelné technologie</b>
ESAB	Avanger	Plasma a Kyslík-palivo	řezání trubek, značení, vrtání, frézování
ESAB	Sabre	Plasma a Kyslík-palivo	až 2 plasma hořáky nebo 8 hořáků kyslík-palivo
Kinetic	K3000	Plasma a Kyslík-palivo	řezání trubek
Kinetic	K4000	Plasma a Kyslík-palivo	řezání trubek, značení , vrtání, frézování
Kinetic	K5000	Plasma a Kyslík-palivo	řezání trubek, značení , vrtání, frézování, automatická změna nástrojů
MGM	Omnicut	Plasma	výrobce nespecifikuje
STIGAL	VX	Plasma a Kyslík-palivo	výrobce nespecifikuje
Messer	MultiTherm	Plasma a Kyslík-palivo	řezání trubek, značení , vrtání, frézování
Messer	OmniMat	Plasma a Kyslík-palivo	řezání trubek, značení , vrtání, frézování



*Obr. 3.10 STIGAL VX standart [15]*



*Obr. 3.11 ESAB Avanger X Large Gantry Plasma & Oxy-fuel [2]*



## **4. Popis technologie plazmového dělení materiálů**

Spoustu lidí i část odborné veřejnosti považuje plazmu za cosi magického. V této stati se pokusím přiblížit tuto metodu a vysvětlit její princip.

Abychom dosáhli optimálního výkonu plazmového řezacího stroje, musíme nejprve pochopit samotný proces řezání. Ještě předtím je ale důležité rozumět tomu, co je plazma. „Plazmu chápeme jako látkové skupenství, které je sice v našich očích méně rozšířené než kapalné, pevné či plynné, ale ve skutečnosti to je nejrozšířenější skupenství vesmíru.“ [8] Na plazmové pálicí stroje je kladena jedna jediná základní podmínka – bezvadný řez.

„Bezvadný řez můžeme chápat jako splnění několika podmínek:

- řez je přímý (pravoúhlý),
- řez je prostý okují,
- řez je bez metalurgických změn materiálu. “[6]

Naneštěstí nežijeme v perfektním světě, a proto mají všechny metody dělení svoje výhody a nevýhody, i plazma.

### **4.1 Co je to plazma?**

Chápeme první tři skupenství - pevné, kapalné, a plynné. Pro lehkou představivost, u vody (resp.  $H_2O$ ), jsou těmito skupenstvími led, voda a pára. Když se energie ve formě tepla přivádí na led, led taje a stává se vodou -  $H_2O$  se transformuje z pevného skupenství (ledu) na kapalinu (vodu). Je-li přivedeno více tepla na vodu, voda se vypařuje a stává se párou.  $H_2O$  transformuje z kapalného skupenství (vody) na plynné skupenství (páru).

A konečně, je-li další teplo přivedeno na plynné skupenství látek, plyny ionizují. Ionizace plynů je poslední změna stavu. Plyny jsou nyní v elektricky vodivém stavu, který je čtvrtým známým skupenstvím hmoty.

Tento často přehlížený "čtvrtý stav hmoty" se nazývá plazma. Ionizovaný plyn se svými současnými účetními vlastnostmi je základní základ, na kterém všechny plazmové systémy fungují.

Příkladem plazmy, který může být viděn v přírodě, je blesk. Stejně jako plazmový hořák, blesk přesunuje elektrický náboj z jednoho místa na druhé. Blesk vzniká z plynů v ovzduší – z ionizačních plynů.

#### **4.2 Popis principu řezu plazmou**

Plazmové řezání je proces, který využívá optimalizovaný otvor trysky, aby usměrnil elektricky nabitý ionizovaný plyn tak, aby mohl být použit k tavení a oddělení částí elektricky vodivých kovů. Elektricky vodivý plyn (plazma) se používá pro přenos energie dodané vnějším zdrojem elektrického proudu z plazmového hořáku na řezaný materiál.

Existují dva typy řezání plazmou - s přeneseným obloukem pro elektricky vodivé a s nepřeneseným pro nevodivé materiály.

Plazmový paprsek vzniká postupně po krocích. Prvním krokem je "zapálení" oblouku mezi vnitřní a vnější elektrodou. Vznikající elektrický oblouk je vyfukován plazmujícím plynem, který se ionizuje - vzniká pilotní paprsek. Po přiblížení paprsku k elektricky vodivému dílu, který je spojen s vnější elektrodou, vyhodnotí řídící elektronika vodivost a zvýší řezací proud na požadovanou velikost, současně se zvětší průchod plazmujícího plynu tryskou. Ionizovaný paprsek - plazmový - má na místě výstupu z hubice teplotu přes 20 000°C, přičemž ionizační napětí by nemělo poklesnout pod 150 V při zatížení, jinak je řez zcela nevyhovující - nekvalitní. Pro běžné dělení, po kterém následuje příprava pro svár, plně vyhovuje jako plazmující plyn vzduch nebo dusík, ale pro kvalitní řezy přímo ke svařování se používá kyslík. Moderní plazmové stroje používají složité hořáky s dalšími vrstvami plynů kolem plazmového paprsku - např. firma Wirbelgas.

Uvedený postup používají plazmy firem Fronius, Kjelberg, Cebora, Miller, Cloos a další.

#### **4.3 Komponenty systému plazmového dělicího zařízení**

Funkce plazmového řezacího stroje závisí na funkcích základních komponent systému plazmové řezačky. Těmi jsou zdroj proudu, startovací okruh, okruh ovládání průtoku plynu a hořák.

*- zdroj proudu*

Produkují konstantní stejnosměrný proud a napětí. Zdroj proudu bývá ve skříni současně s obvody pro řízení a spouštění celého systému. Skříň zdroje proudu dále obsahuje soustavu pro chlazení hořáku.



*Obr. 4.1 Zdroj Hypertherm HT2000 [5]*

*- startovací okruh*

Startovací okruh je vysokofrekvenční zdroj, který může být ve stejné skříni spolu se zdrojem proudu, ale je možné ho mít i odděleně. Oddělené řešení nám umožní mít zdroj proudu až 60m od plazmového hořáku

*- okruh ovládání průtoku plynu*

Základní regulace tlaku může být provedena redukčními ventily dále pak elektronicky řízena např. selenoidovými ventily. Nedílnou součástí toho ovládání jsou kontrolní manometry.

Sofistikované systémy dovolují řízení plynů přímo z místa obsluhy.

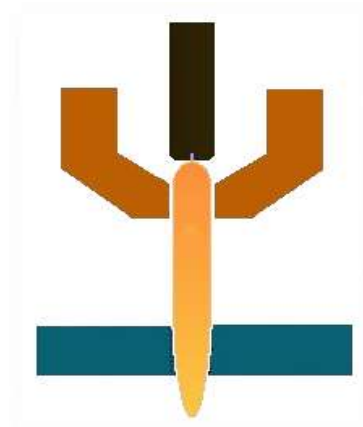


*Obr. 4.2 Panel plynů*

*- hořák*

Plazmový hořák může být různé konstrukce, záleží na použitém plynu (resp. použitých plynech). Hořák je osazen spotřebními díly – počítá se s tím, že se opotřebovávají provozem. Spotřební díly pro plazmové hořáky dodává nespočet výrobců.

V hořáku je generována plazma, je tedy jednou z nejdůležitějších komponent soustavy.



*Obr. 4.3 Schéma hořáku*

Základními typy hořáků jsou hořáky jednoplynové, dvouplynové (plasmový plyn a inertní plyn) a víceplynové.

#### **4.4 Volba plynů**

Při řezání plazmou jsou plyny určeny výrobcem dané řezací soupravy. Široký výběr plynů k řezání plazmou dodává společnost Linde Technogas:

**Argon/vodík směsi:** používá se příměs vodíku 5–35%. Směsi s větším obsahem vodíku se hodí k řezání nerezavějící oceli a hliníkových slitin. Směsi nižším obsahem vodíku se používají k řezání nízkolegovaných ocelí a uhlíkových ocelí.

**Dusík:** nejčastěji používán v dvou-plynových hořácích, pro řezání všech kovů. Dusík je také používán jako ochranný plyn, když směs argon/vodík je plazmujícím plynem.

**Vzduch:** suchý, stlačený vzduch je velmi často používán – zejména v malých, ručních strojích, a nebo pro řezání tenkých plechů

**Kyslík:** obvykle používán pouze jako plazmující plyn, při řezání uhlíkových a nízkolegovaných ocelí.

**Oxid uhličitý:** slouží k chlazení trysky, když je dusík používán jako plazmující plyn

*Tab. 4.1 Výběr plazmového plynu [9]*

<b>Tabulka pro výběr plazmového plynu</b>			
<b>Plyn</b>	<b>Doporučeno pro</b>	<b>výhody</b>	<b>Nevýhody</b>
vzduch	uhlíková ocel nerez	čistý rychlý řez na uhlíkové oceli cenově dostupné vhodný	krátká životnost elektrod nitridace na řezu oxidace na nerez, hliníku
dusík	nerez hliník uhlíková ocel	vynikající řez na nerez a hliníku vynikající životnost elektrod cenově dostupné	nitridace na řezu
argon/vodík	nerez hliník	kvalita řezu a rychlost pro silnější mat. méně spalin(splodin)	drahý nevhodný pro uhlíkovou ocel
kyslík	uhlíková ocel	čistý řez nez povrchové nitridace rychlost řezu	krátká životnost elektrod oxidace na nerez, hliníku

Tab. 4.2 Výběr sekundárního plynu [9]

Tabulka pro výběr sekundárního plynu			
Plyn	používá se s	výhody	nevýhody
vzduch	vzduch/dusík kyslík	vhodný cenově dostupné	nitridace na řezu
oxid uhličitý	dusík	ochranný plyn pro většinu kovů životnost dílů netvoří se struska	hrubý povrch řezu
dusík	dusík argon/vodík	vynikající kvalita řezu hliníku a nerezi	nitridace na řezu kratší životnost než u CO <sub>2</sub>
(voda)	Dusík argon/vodík Kyslík	vynikající kvalita řezu hliníku a nerezi  méně spalín (splodin)	nečistý řez vyžaduje dobrou kvalitu vody

Tab. 4.3 Sklon hořáku [9]

Doporučený úhel oblouku	
plasmový plyn	dobrá rychlost řezu při
vzduch	vertikálním oblouku
dusík	5-10° po směru řezu
argon-vodík	5-10° po směru řezu
kyslík	nepatrně dopředný oblouk

Tab. 4.4 Doporučená vzdálenost trysky od materiálu [9]

Vzdálenost trysky od materiálu	
síla materiálu	vzdálenost trysky
do 3mm	1,5mm
3-12mm	3mm
12-25mm	5mm
více než 25mm	7mm

## **5. Ovládání stroje**

V této kapitole jsou popsány vlastnosti a ovládání navrženého stroje. Stroj je výhradně řízen z místa obsluhy- terminálu.

### **5.1 Řídicí systém**

Srdcem ovládání stroje je řídicí systém pro pálicí automaty CUTCOMP verze 1.20. Tento řídicí systém je složen s programu pro PC ( konkrétně platforma Windows XP SP3) a řídicí jednotky. Tyto části tvoří hlavní know-how stroje a jsou vytvořeny panem Martinem Novákem, konzultantem této práce.

Řídicí systém umožňuje následující funkce:

- jednoduché ovládání a nastavení pálicího procesu
- výběr rezného plánu (v programu nazván „grafika“) ve formátu CNC generovaného programu WRYKRYs a jiných, nebo z vlastního integrovaného editoru
- manipulace jednotlivými grafikami (posouvání, kopírování, zrcadlení, natáčení, řazení do pálicí sestavy přímo na stroji)
- funkce plech a práce s ním (posouvání, rotace ručně nebo podle již položeného materiálu se všemi grafikami na plechu)
- automatické uložení sestavy grafik po startu řezu (ruční uložení kdykoliv v průběhu jeho vytváření)
- ruční i strojní přepínání mezi 2 rychlostmi řezu
- nastavitelná dynamika posuvu (zrychlení)
- řezání vybrané sestavy (posuv po sestavě):
  - se zapnutou plazmou
  - s vypnutou plazmou
  - s adaptivní regulací plazmy (regulace konstantní výšky hořáku nad materiálem
  - bez adaptivní regulace plazmy
- zastavení řezu na trajektorii a pohyb ručně dopředu i zpět, opuštění dráhy řezu libovolnými směry včetně odjezdu a čištění, a opětovný návrat do dráhy řezu
- dvě libovolná, okamžitě nastavitelná místa pro odjezd hořáku (odjezd a čištění)
- automatické omezování rychlosti řezání podle poloměru oblouků
- ruční pohyby hořáku v osách X,Y,Z

- se zapnutou plazmou
- bez zapnuté plazmy
- s adaptivní regulací
- bez adaptivní regulace
- grafické znázornění řezného plánu a pohybu hořáku včetně funkce „ZOOM“
- zobrazování aktuální polohy a rychlosti hořáku
- indikace poruch
- nastavitelná rychlost přejezdu
- za běhu řezu nastavitelná rychlost řezu
- nastavitelná rychlost zdvihu a sestupu
- ruční i strojní přepínání mezi 2 rychlostmi řezu
- nastavitelná dynamika posuvu (zrychlení)
- integrovaný systém pro řezání směsí kyslík-palivo
- integrovaný, nastavitelný systém řízeného sestupu hořáku na materiál při propichu
- integrovaný systém pro popis plazmou
- tabulky materiálu (možnost rychlého nastavení stroje podle zvoleného materiálu k řezu)
- možnost rychlého ručního řezu podle ručního posuvu nebo mezi body odjezdu a čištění
- výstupy směr a krok
- upgrade řídicí jednotky uživatelem pomocí dodaného souboru (na dálku)

## **5.2 Bezpečnost**

Stroj smí ovládat pouze obsluha zaškolená podle ČSN 05 0730 či ČSN 05 0705, zaškolení pro řezače plazmou.

Tato obsluha setrvává na svém pracovišti, tj. u terminálu. Jakmile je stroj spuštěn k provozu, obsluha zajistí volný prostor v okolí stroje min. 0,8m.

Bezpečnostní tlačítka červené barvy „STOP“ se nacházejí na každé straně portálu a na ovládacím terminálu.

### **5.3 Před uvedením do provozu**

Stroj nutno vizuálně zkontrolovat před každým spuštěním. Kontroluje se přiléhavost krytů, poškození elektroinstalace, stav ozubených hřebenů a vůle.

### **5.4 Mazání**

Stroj je zakázáno mazat jakýmkoliv mazivou, snížila by se tak životnost zařízení. Součásti, zejména ty, které rotují, jsou mazány v ložiskách, neměnitelnými celoživotními náplněmi.

### **5.5 Čištění**

Stroj nutno čistit co nejčastěji, a dbát, aby byly pohyblivé součásti prosty kovového prachu. Čistí se lineární posuvy, hřebeny ozubení, ozubená kola. K čištění mechanických částí lze s výhodou použít suchého štětce.

Plazmový hořák se čistí dle návodu výrobce hořáku.

### **5.6 Zvýšení životnosti**

Životnost dílů plazmové soustavy je omezená, stejně jako životnost jiných strojů. Je nutno vědět, že životnost těchto dílů (vč. „Spotřebních dílů“) lze prodloužit vhodnou péčí o ně, a to zejména čištěním – dle kap. 5.5.

Pro zvýšení životnosti spotřebních částí plynové soustavy je třeba udržovat stálý a vhodný průtok plynu, včetně jeho tlaku. Pokud by byl tlak příliš vysoký, životnost elektrod bude negativně ovlivněna. Pokud by byl naopak nízký, sníží se životnost trysky.

Životnost hořáku je dále ovlivněna vzdáleností od trysky plechu. Je vhodné udržovat vzdálenost dle tab. 4.4. Při děrování je vhodné natáhnout oblouk do dvojnásobku doporučené délky, nebo maximálně, dokud prochází proud. Toto vyžaduje zručnost a zkušenosti obsluhy.



Je nutné vzít v úvahu výkonnost systému. Obvykle 100A zdroj je schopen řezat do tl. 25mm, avšak děruje maximálně 15mm. Platí pravidlo, že děrování je možné do poloviny maximální tloušťky řezu. Nikdy nepřetěžujeme soustavu. Je vhodné používat trysku na maximálně 95% jejího udáveného zatížení.

Velmi důležitou podmínkou je suchost a čistota vzduchu, pokud je použit jako plazmující plyn. Nevhodné složení plynu může způsobovat zkrat v hořáku a jeho sníženou životnost. Čistotu plynu ověříme tak, že spustíme plyn, trysku namíříme proti zrcátku, ale oblouk nezapalujeme. Pokud na zrcátku ulpívají kapičky oleje či vody, je jasné, že plyn není čistý, a toto je nutno napravit.

Je vhodné vyvarovat se startům plazmy děrováním, vždy je výhodnější začít od okraje plechu. Je též vhodné sledovat pilotní oblouk, a ten co nejvíce zkrátit. Ušetříme tak životnost elektrod.

Je vhodné použít směs proti stříkání. Tato směs se prodává ve formě sprejů (lze použít spreje proti „kuličkování“ pro svařování v ochranné atmosféře – MIG), roztoků, atd. Toto neplatí pro plazmové přístroje s tryskou vybavenou ochranným plynem.

Vždy je nutné dělit plechy čisté, zbavené předchozí strusky, odmaštěné. Po dokončení řezání je vhodné nechat 2-3 minuty proudit plyn – zchladí komponenty trysky. Trysku je v případě nouze možné čistit peroxidem vodíku.

## **5.7 Uvedení do provozu**

Portál je v parkovací poloze – je zaparkován. Nyní usadíme tabuli plechu na stůl. Po usazení tabule najedeme hořákem na rohy plechu, a tímto určíme polohu (CUTCOMP). Zkontrolujeme, zda má hořák dostatečnou výšku nad materiálem a může začít s řezáním.

## **6. Návrh zařízení**

Dle zadání práce mám navrhnout nosič plasmového hořáku, který zvládá pohyb tryskou ve třech k sobě kolmých osách – X,Y,Z. Požadavkem podobných zařízení je jednoduchost, spolehlivost a co nejmenší hmotnost stroje, to proto, že hmotnost je přímo úměrná ceně.

Základním stavebním prvkem tohoto stroje je portál, ten bude navržen jako první, dále pracovní stůl, a jako poslední bude zpracován terminál.

Stroj, který budu navrhovat, spadá do kategorie „střední stroje“, „portál nesen stolem“ (viz. kap. 3).

Vzhledem k hmotnosti je ale nutné zaujmout ještě jiné stanovisko, a to z hlediska marketingu. Spousta uživatelů těchto strojů nevěří použití hliníkových slitin a jim podobných – žádají, aby stroje byly „bytelné“ a konstruované z ocelí. To s sebou přináší výhody i nevýhody.

Výběr z mnoha možných variant je obtížný. V této kapitole zvolím a zdůvodním adekvátní řešení, které bude splňovat zadané podmínky.

### **6.1 Výběr materiálu konstrukce**

Požadavkem na tříosý mechanismus je, aby pracoval hladce bez deformací. V tab. 6.1 jsou uvedeny obvyklé materiály, ze kterých bývají stroje vyrobeny.

Pro velmi malé stroje, kam mnou navrhovaný nepatří, se jeví jako nejvýhodnější variantou hliníková slitina.

Po konzultaci se zadavatelem je zvolena uhlíková ocel, a to z několika hlavních důvodů – dostupnost profilů, prediktivní chování při svařování, cena, bytelnost konstrukce. Stroje budou v budoucnu rozšiřovány na větší, a vůlí je, aby bylo co nejvíce dílů stejných.

Tab. 6.1 Porovnání použitelných materiálů konstrukce

	<i>výhody</i>	<i>nevýhody</i>
<b>Uhlíková ocel</b>	cena	hmotnost
	lehká svařitelnost	zhoršená dynamika
	dostupnost	nutnost silnějších pohonů
	pevnost	
<b>Hliníková slitina</b>	hmotnost	cena
	dynamika provozu	podmíněná svařitelnost
		pevnost

## 6.2 Výběr hnacího ústrojí

Hnací ústrojí je základním funkčním celkem tohoto stroje. K použití se nabízí několik řešení, méně i více obvyklých. Na výběru motoru záleží volba vhodného převodu do lineárního pohybu. Přehled vlastností hnacích ústrojí ukazuje tab. 6.2.

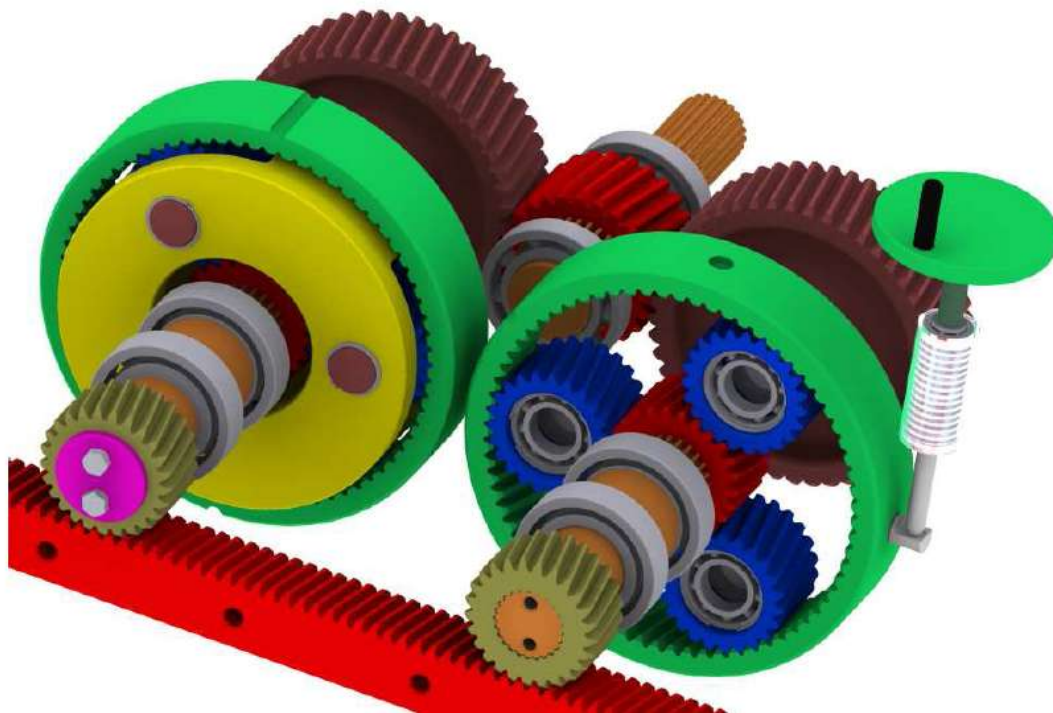
Tab. 6.2 Srovnání hnacích ústrojí

	<i>Výhody</i>	<i>nevýhody</i>
<b>Ozubený hřeben</b>	cena	vůle
	vysoký přenesitelný výkon	opotřebení
	tuhost převodu	hluk
<b>Ozubený řemen</b>	nízká hlučnost	nižší účinnost
	nízké opotřebení	cena
	nízká hmotnost	skluz převodu
		přídavný převod
<b>Lineární pohon</b>	není třeba převádět kroutící moment na surný pohyb	cena
		dynamika provozu
		Složitě použití
<b>Kuličkový šroub</b>	přesnost	nižší účinnost
	životnost	cena
	tuhost	nárok na čistotu

Po konzultaci se zadavatelem jsme došli k závěru, že nejvhodnějším ústrojím bude i přes svoje nevýhody ozubený hřeben. K tomuto závěru nás vedla skutečnost, že hřeben je obvyklý u takovýchto strojů, je velmi levný, a univerzální. Na všech osách tedy bude použito ozubeného hřebene.

Hlavní nevýhodou tohoto systému pohonu je hluk, ten je úměrný obdobným zařízením, a je třeba zmínit, že tento hluk přehluší hluk hořáku a generátoru plazmy. Opotřebení je sice podstatnou nevýhodou, ale při ceně hřebenu a pastorku a vzhledem k abrazivnosti prostředí v místě nasazení je nutno považovat toto za spotřební materiál, podobně jako komponenty hořáku. Poslední nevýhodou tohoto pohonu - vůle není nevýhodou zásadní. Vůle 0,5mm je ještě přípustná. Bohužel nelze stanovit do jaké vůle se ozubení a jak rychle opotřebuje. Vliv vůle bude předmětem sledování při prototypových zkouškách.

Vůle, jinak těž mrtvý chod, lze odstranit aplikováním konstrukčních prvků, konzultovaných s doktorandem katedry 347 Ing. Zdeňkem Klosem, zmíněných v [7]. Jako nejvýhodnější považuji řešení výše zmiňovaného (obr.6.1), bylo by ale nutné upravit tuto bezvůlovou převodovku k přenosu nižšího momentu.



*Obr. 6.1 Konstrukční řešení bezvůlové převodovky ing. Klose [7]*

Jak je pochopitelné z obr. 6.1, v případě budoucího použití této převodovky, cena převodu rotačního do lineárního posuvu se zvýší, a bude namísto uvažovat o celkově jiném konstrukčním řešení pohonů.

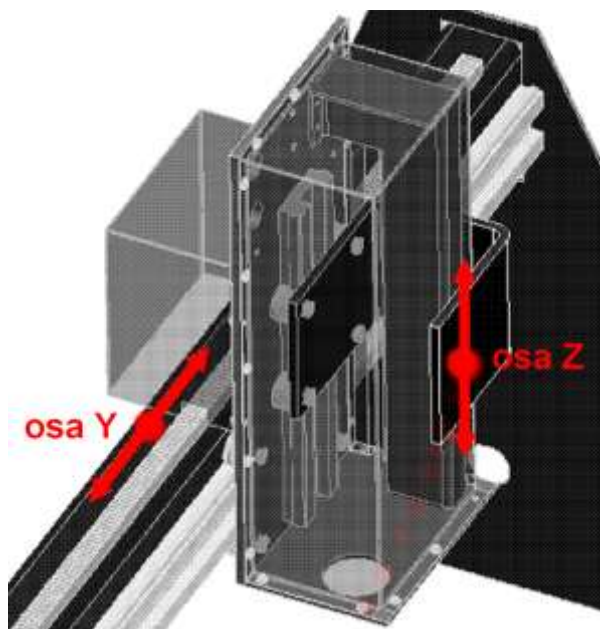
Pro unifikaci pohonu je nutno použít co nejméně rozdílných komponent. Proto bude použito ve všech osách hřebenu stejného modulu ozubení, rozdílné délky.

Pohon pastorku, který přiléhá k hřebenu, musí být řešen krokovým motorem, a to z důvodu nutnosti přesného polohování.

### **6.3 Návrh osy Z**

Pohyb v ose Z určuje zdvih hořáku nad materiálem. Zdvih osy Z je lineární pohyb, proto vznikla nutnost použití lineárních vedení, viz. obr. 6.2.

Konstrukční řešení se skládá z lineárního vedení, držáku trysky, ozubeného kola, hřebenu a krokového elektromotoru LeadShine Technology 57HS22 o parametrech v tab. 6.3.



*Obr. 6.2 Konstrukční řešení pohybu osy Z*

*Tab. 6.3 Katalogové parametry elektromotoru LeadShine Technology*

	$I_{rz}$	$I_{mz}$	$m_{mz}$	$M_{MZ}$
typ motoru	Moment setrvačnosti	proud odebínaný při $M_z$	Hmotnost	Moment záběrný
57HS22	480 g.cm <sup>2</sup>	5,7A	1,15kg	2,2Nm



- *silový výpočet osy Z*

$$\begin{aligned} G_z &= (m_h + m_z) \cdot g \\ G_z &= (2,76 + 4,35) \cdot 9,81 \\ G_z &= 69,75 N \end{aligned} \quad (6.1)$$
$$F_{MZ} = \frac{M_z}{\frac{d_0}{2}} \quad (6.2)$$

$$F_{MZ} = \frac{2,2}{0,0195}$$

$$F_{MZ} = 225,5 N$$
$$a_z = \frac{(F_{Mz} - G_z)}{(m_b + m_s)} \quad (6.3)$$

$$a_z = \frac{(225,5 - 69,75)}{(2,76 + 4,35)}$$

$$a_z = 21,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Mechanismus se může v ose Z pohybovat se zrychlením  $a_z$ , a to v případě, že bude zatížen hmotnostmi výše specifikovanými.

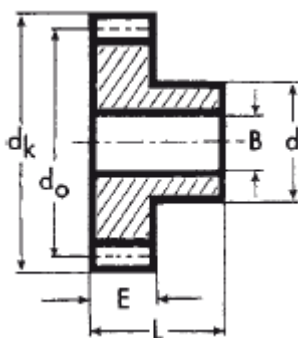
- ozubení osy Z

Ozubení osy Z bylo kontrolováno v programu prof. Miloše Němčeka Geometrie.exe, resp. CSNw.exe. Výrobce neuvádí velikost korekce, proto bylo nutno určit korekci ozubení v programu Profil.exe stejného autora. Výstupy programů jsou součástí přílohy. Relativně vysoká hodnota měrných skluzů je dána pastorkem s nízkým počtem zubů.

Jako převod rotačního do lineárního pohybu bude použit ozubený hřeben a čelní ozubené kolo, ze sortimentu firmy TEA Technik o parametrech v tab. 6.4.

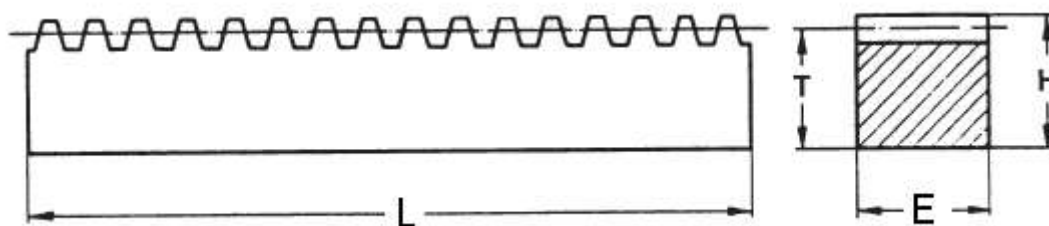
Tab.6.4 Katalogové parametry ozubení v ose Z

typ	B	d	$d_k$	$d_o$	L	E	z	Obj.č.	m
Čelní oz.	8mm	15mm	22,5mm	19,5mm	30mm	17mm	13	OK1513	1,5



Obr. 6.4 Schéma kola OK1513

Kolo z oceli C43 (ekvivalentem je ocel 12 050[16]) je přímo montováno na hřídel motoru. Motor je držákem přišroubován k rámu, který zachycuje reakční síly z ozubení. Hřeben je součástí „vozíku“ osy Z, se kterou se pohybuje na lineárním vedení. Hřeben modulu 1,5mm a délky  $L=210\text{mm}$   $E=17\text{mm}$  je opět ze sortimentu fy TEA Technik.



Obr. 6.5 Schéma hřebenu

- lineární vedení osy Z

Důležitou součástí zabezpečující přesný pohyb po určené lineární dráze se nazývá lineární vedení. Na lineární vedení jsou kladeny následující požadavky:

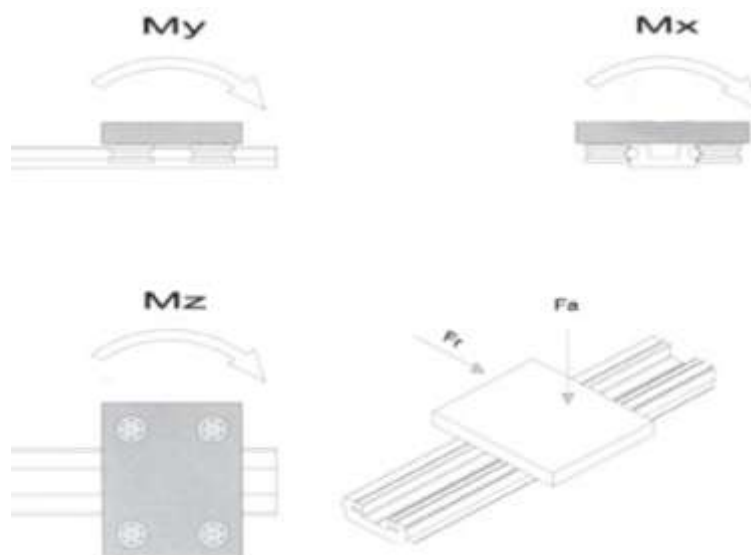
- odolnost proti nečistotám
- dlouhá životnost
- bezúdržbový provoz
- nízká hlučnost
- snadná montáž
- schopnost provozu bez domazávání
- přesnost polohování

Po průzkumu trhu padla volba na rolníčkové vedení typu GD[12], kde vůle a předpětí mezi vodícími rolnami určuje tuhost, resp. hladkost běhu. Volba lineárního vedení byla konzultována s dodavatelem a padla volba na lineární vedení GD10 opatřeného kladičkami 30C a 30E s parametry v tabulce 6.5.

Tab. 6.5 Katalogové únosnosti vedení GD10 [12]

Komponenty			Max. zatížení [N]		Statický moment [Nm]		
Kolejnice	Deska	Rolna	Fr	Fa	My	Mz	Mx
DG10	C10B	30C-E	1900	1600	184	368	142

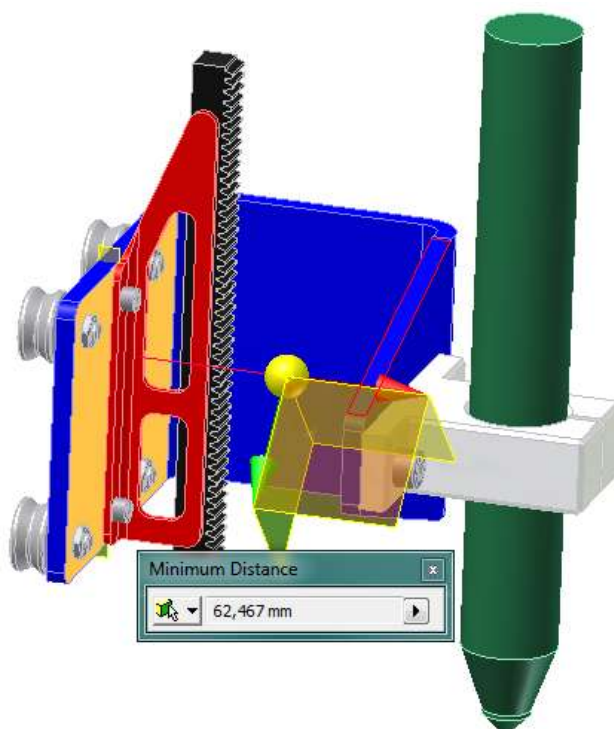




*Obr. 6.6 Možnosti zatěžování lineárního vedení*

Vedení GD je složeno z vedení (kolejnice) a vozíku. Kolejnice je vyrobena z hliníkového profilu, v němž jsou zalisovány dvě kalené a broušené tyče. Kolejnice se vyrábějí do délky 6m. Vozík je složen z desky (v našem případě je vlastní výroby z oceli), a z vodících roln s klínovou drážkou na vnějším průměru. Dvě rolly ze čtyř jsou na excentrickém čepu.

V našem případě je vedení osy Z zatíženo jako na případu „My“ dle obr. 6.6.



*Obr. 6.7 Konstrukce pohyblivé osy Z*

Programem Autodesk Inventor 2009 bylo zjištěno těžiště pohyblivé soustavy, které je nepatrně vystředěno a největší vzdálenost těžiště je  $x=62,467$  mm (obr. 6.7). Jednoduchým výpočtem zjistíme ohybový moment  $M_{zy}$ .

$$M_{zy} = x \cdot G_z \quad (6.4)$$

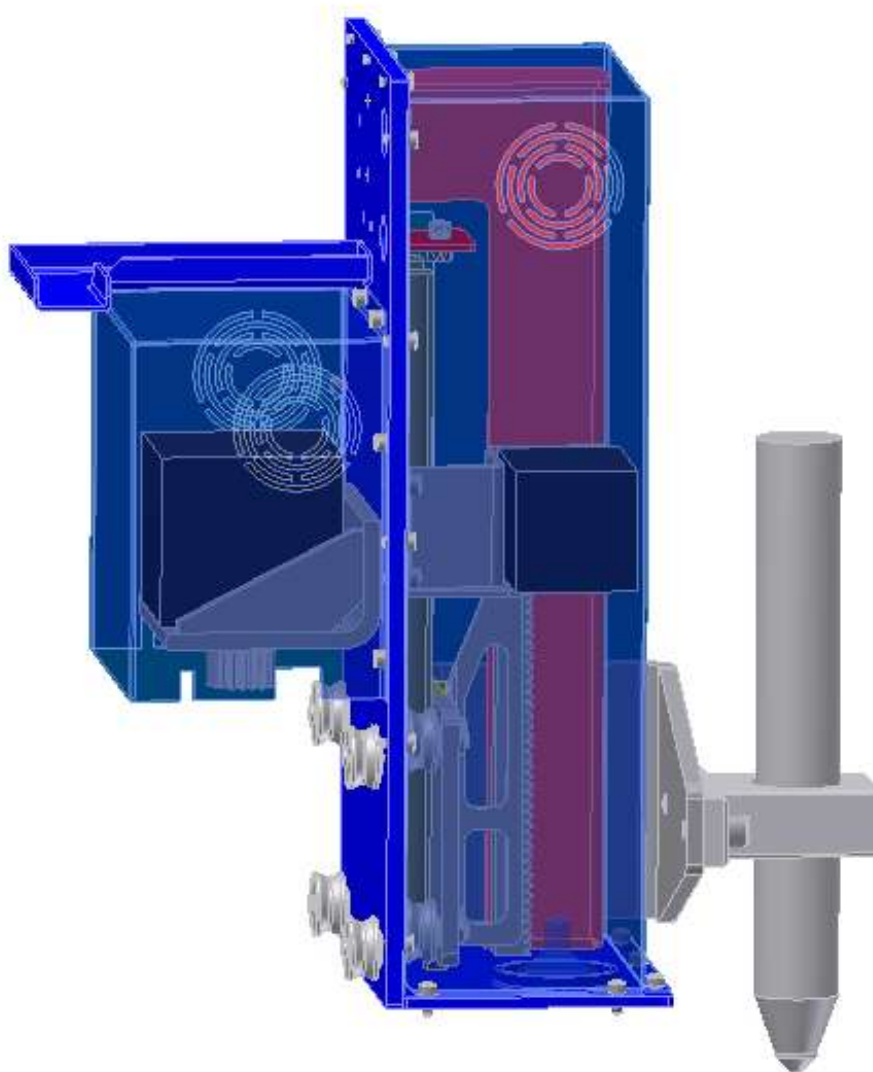
$$M_{zy} = 0,062467 \cdot 69,75$$

$$M_{zy} = 4,4 N \cdot m$$

$$M_{zy} < M_y$$

Z této podmínky plyne, že vedení GD10 s rolničkami 30C resp. 30E nejvyšší možnou zátěží vydrží s velikou rezervou – je předimenzované. Hřeben M1,5 i vedení GD10 se nakupuje v metráži, proto bylo účelné využít zbytky z osy X, resp. Y při konstrukci osy Z.

#### **6.4 Návrh osy Y**



*Obr. 6.8 Vozík osy Y osazen osou Z*

Pohyb vozíku v ose Y „vezoucí“ osu Z znázorňuje obr. 6.8. Tentokrát bude ale umístěn hřeben přímo na portálu, a tak se motor bude pohybovat společně s vozíčkem. Potřebná dynamika provozu byla zadavatelem práce stanovena na  $8 \text{ m.s}^{-2}$ .

Při různém zdvihu hořáku v ose Z se mírně mění těžiště soustavy. Proto bylo ve výpočtu bráno nejméně výhodné těžiště.

Znamé skutečnosti vstupující do výpočtu:

$a = 8 \text{ m.s}^{-2}$  – zrychlení soustavy v ose X a Y

$m_v = 24 \text{ kg}$  – hmotnost hmot pohybujících se v ose Y

Odhadované skutečnosti vstupující do výpočtu:

$k = 0,01$  – koeficient valení po dráze [14]

- *výpočet síly nutné k danému zrychlení soustavy*

Motor roztáčející ozubené kolo, které zabírá do ozubeného hřebenu, uděluje soustavě zrychlení. Nyní určíme potřebnou sílu  $F_v$  k pohybu vozíku ve směru osy Y, zvětšenou o valivý odpor kolejové dráhy  $F_v$ :

$$F_y = m_v \cdot a + F_v \quad (6.6)$$

$$F_y = m_v \cdot a + k \cdot G_v$$

$$F_y = m_v \cdot a + k \cdot m_v \cdot g$$

$$F_y = 24 \cdot 8 + 0,01 \cdot 24 \cdot 9,81$$

$$F_y = 215,6 \text{ N}$$

- *volba motoru a ozubení*

Ze znalosti síly  $F_v$  nutné ke zrychlení vozíku můžeme určit velikost motoru a ozubeného kola, i hřebenu. Motor byl vybrán po konzultaci se zadavatelem, parametry v tab. 6.6.

Pokud vyjdeme ze záběrného momentu motoru, můžeme určit roztečnou kružnici ozubeného kola.

Tab. 6.6 Katalogové parametry elektromotoru LeadShine Technology

	$I_{ry}$	$I_{my}$	$m_{my}$	$M_{My}$
typ motoru	Moment setrvačnosti	proud odebíraný při $M_M$	Hmotnost	Moment záběrný
86HS45	1400 g.cm <sup>2</sup>	6,0A	2,3kg	4,5Nm

$$M_{My} = \frac{d_y}{2} \cdot F_y \quad (6.8)$$

$$d_y = \frac{2 \cdot M_{My}}{F_y}$$

$$d_y = \frac{2 \cdot 4,5}{215,6}$$

$$d_y = 0,0417m = 41,7mm$$

Abychom přenesli vypočtenou sílu, musíme použít ozubené kolo o maximálním roztečném průměru  $d_y$ .

Pokud zvolíme kolo s vyšším průměrem, získáme menší zrychlení, ale vyšší výslednou rychlost. Pokud použijeme kolo s menším roztečným průměrem, získáme požadované zrychlení a snížíme zatěžování motoru.

Jako hnací kolo osy Y volím kolo OK1522 [12] o 22zubech M1,5 s roztečným průměrem  $d_0=33mm$ , které bylo zkontrolováno zjednodušeným výpočtem dle ČSN 01 4686. Kolo je pevnostně vyhovující.

- kontrola lineárního vedení

Lineární vedení v ose Y je zabezpečeno rolničko-kolejovým systémem GD10 a rolnami 30E a 30C. Tyto jsou specifikovány tab. 6.4 a obr. 6.5.

Namáhání v ose Y je dle pozic obrázku 6.5 následující:

- $F_r$  - odpovídá gravitační síle  $G_v$
- $M_y$ , způsobený zrychlením silou  $F_v$  na rameni 19,6 mm (obr.6.9)

- $M_z$ , způsobený zrychlením silou  $F_v$  na rameni 106,3 mm (obr.6.9)
- $M_x$  a  $F_a$  jsou zanedbatelně malé, nebudou brány v úvahu

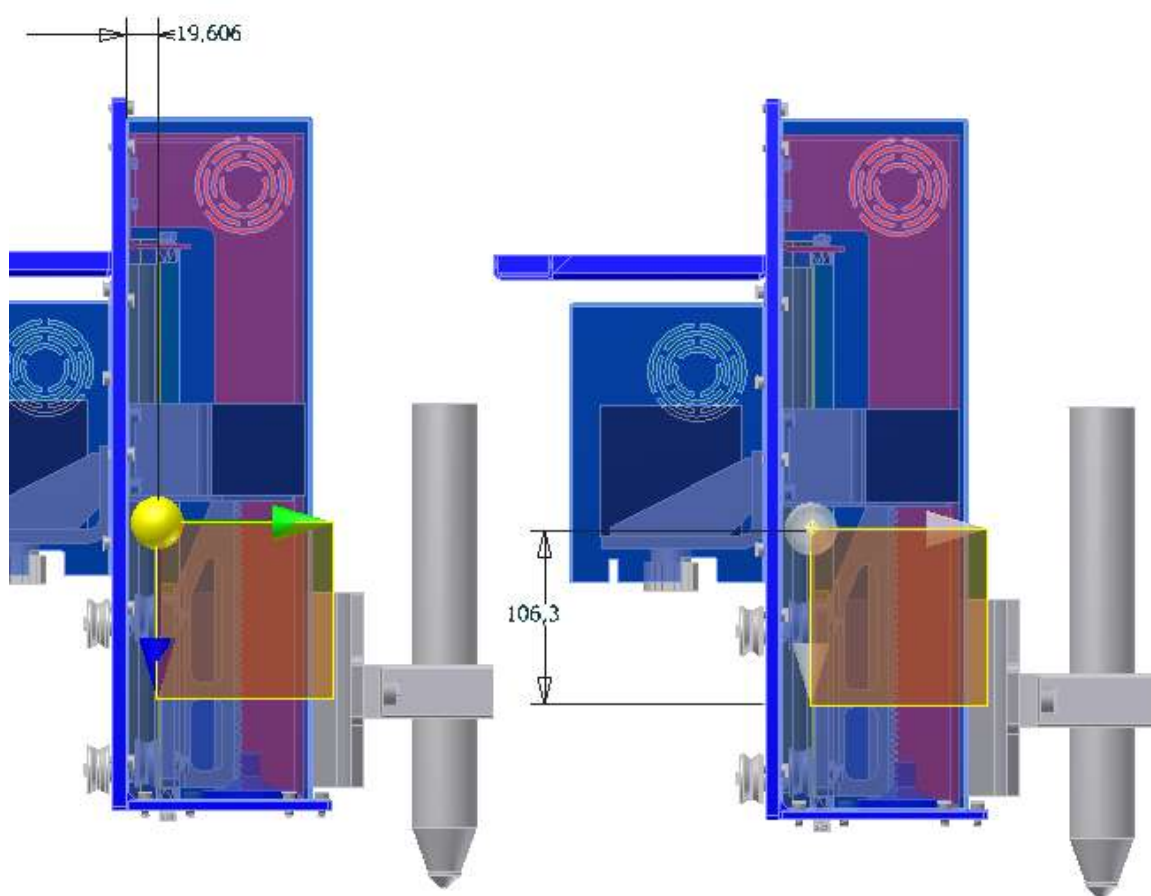
*Kontrola pro případ „Fr“*

$$G_v = m_v \cdot g \quad (6.9)$$

$$G_v = 24 \cdot 9,81$$

$$G_v = 235,4N$$

Po srovnání s tab. 6.5 vedení vyhovuje ( $Fr > G_v$ )



Obr. 6.9 Vybrané vzdálenosti těžiště závislé na daném konstrukčním řešení

*Kontrola pro případ „My“*

$$M_{yy} = 19,606 \cdot 10^{-3} \cdot F_y \quad (6.10)$$

$$M_{yy} = 0,019606 \cdot 215,6$$

$$M_{yy} = 4,2Nm$$

Po srovnání s tab. 6.4 vedení vyhovuje ( $M_y > M_{yy}$ )

*Kontrola pro případ „Mz“*

$$M_{yz} = 106,3 \cdot 10^{-3} \cdot F_y \quad (6.11)$$

$$M_{yz} = 0,1063 \cdot 215,6$$

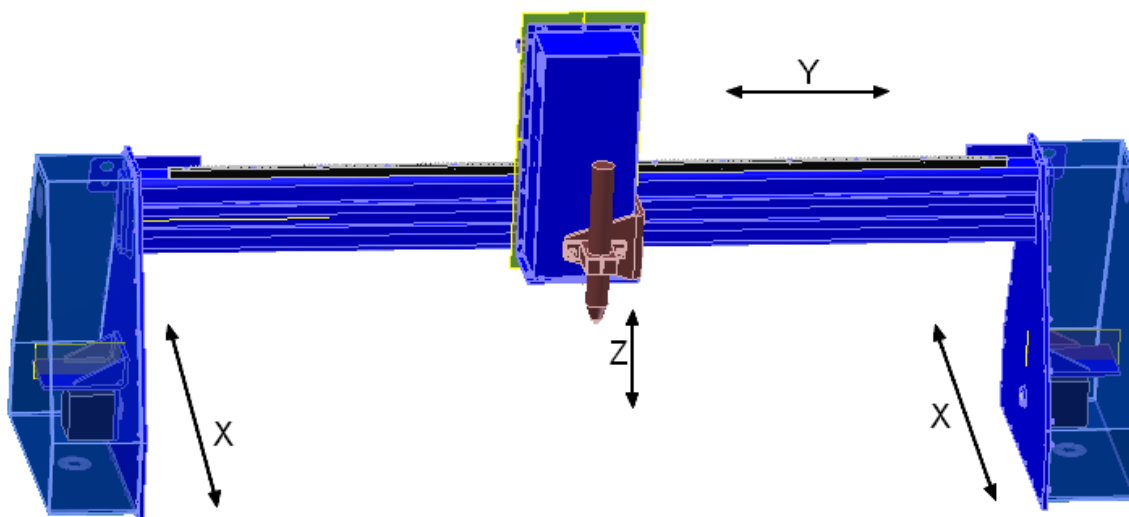
$$M_{yz} = 22,9 Nm$$

Po srovnání s tab. 6.4 vedení vyhovuje ( $M_z > M_{yz}$ )

Tímto je navržen a zkontrolován posuv v osy Y.

## **6.5 Návrh osy X**

Poslední osou, po které se musí tentokrát celý portál pohybovat je osa X (obr. 6.10).



*Obr. 6.10 Schéma celého portálu s vyznačenými osami pohybu*

Portál, tedy dosud navržený pohyb po ose Z a Y se musí ještě pohybovat nad stolem v ose X.

Přesto, že je portál tuhý, je nutno navrhnout pohony na obou stranách portálu, protože pokud by byl pohon jen na straně jedné, docházelo by ke křížení v lineárním vedení. Proto je nutné navrhnout motory, vedení i ozubení symetricky – na obou stranách stejné.

Známé skutečnosti vstupující do výpočtu:

$$\begin{aligned} a &= 8 \text{ m.s}^{-2} && \text{– zrychlení soustavy v ose X a Y} \\ m_p &= 118 \text{ kg} && \text{– hmotnost sestavy pohybujících se v ose X} \end{aligned}$$

Odhadované skutečnosti vstupující do výpočtu:

$$k = 0,01 \quad \text{– koeficient valení po dráze [14]}$$

- *výpočet síly nutné k danému zrychlení soustavy*

Určíme potřebnou sílu  $F_x$  k pohybu vozíku ve směru osy X, zvětšenou o dvounásobný valivý odpor kolejové dráhy (použijeme 2 vedení)  $F_p$ :

$$F_x = m_p \cdot a + 2 \cdot F_v \tag{6.12}$$

$$F_x = m_p \cdot a + 2 \cdot k \cdot G_p$$

$$F_x = m_p \cdot a + 2 \cdot k \cdot m_p \cdot g$$

$$F_x = 118 \cdot 8 + 2 \cdot 0,01 \cdot 118 \cdot 9,81$$

$$F_x = 967,2 \text{ N}$$

- *volba ozubení*

Pro osu Z bylo dimenzováno ozubení, a bylo zjištěno, že je nutno použít čelní ozubené kolo o šíři 17mm a počtu zubů 22 z materiálu C45(odpovídá 12050 zušlechtěná [16]). Ozubený hřeben je navržen o stejné šíři, ale je z materiálu C43(odp. 12 050 normalizačně žíhaná[16]).

Kontrolní výpočet ozubení s důrazem na kontrolu na dotyk osy Z je součástí příloh. Ve výpočtu je uvedena síla  $F_x/2$ , z toho důvodu, že jsou použity 2 ozubené hřebeny a dvě ozubená kola.

- *volba motoru*

Nyní musíme určit, jaký motor bude použit. Z konstrukčního řešení je nutno použít dvojici motorů stejných parametrů

$$M_{MX} = \frac{d_0}{2} \cdot \frac{F_x}{2} \quad (6.13)$$

$$M_{MX} = \frac{0,033}{2} \cdot \frac{967,2}{2}$$

$$M_{MX} = 7,98 N \cdot m$$

Jako hnací motory osy X volím motory LeadShine Technology 86HS85 s parametry v tab. 6.7

Tab. 6.7 Katalogové parametry motoru 86H85 [10]

	$I_{rx}$	$I_{mx}$	$m_{mx}$	$M_{Mx}$
typ motoru	Moment setrvačnosti	proud odebínaný při $M_M$	Hmotnost	Moment záběrný
86HS85	2700 g.cm <sup>2</sup>	6,8A	3,8kg	8,5Nm

- volba lineárního vedení

Aplikace lineárního vedení byla konzultována s dodavatelem, a zvolili jsme vedení GD10, avšak vozík je vlastní výroby a má prodlouženou vzdálenost mezi kladičkami (30E+30C) pětinasobně. Tímto se získala stabilita portálu, a též se zvýšila únosnost v ohledu  $M_x, M_y, M_z$  (dle obr. 6.6).

Zatěžování tohoto lineárního vedení je pouze případem „Fr“, protože ev. ohybový moment odebírá druhé vedení, resp. druhý pár rolíček.

Kontrola pro případ „Fr“

$$G_p = m_p \cdot g \quad (6.14)$$

$$G_p = 118 \cdot 9,81$$

$$G_p = 1157,6 N$$

$G_p$  je gravitační síla, která působí na celý portál, resp. v jeho těžišti. Těžiště této soustavy je pohyblivé, a při zrychlení mohou v nejhorším případě působit síly jen na



přední dvojici vedení, proto musí být každé vedení dimenzováno na celou gravitační sílu portálu.

$$k_v = \frac{F_r}{G_p} \quad (6.15)$$

$$k_v = \frac{1900}{1157,63}$$

$$k_v = 1,6$$

Vedení je navrženo a ověřeno s bezpečnostním koeficientem  $k_v=1,6$ .

## **6.6 Výpočet nosníku portálu metodou konečných prvků (MKP)**

Nosník portálu, resp. celý portál se musí vyznačovat vysokou tuhostí. Tuhost v našem případě znamená, že se deformace tohoto nosníku blíží nule.

Analytický výpočet podobné součásti toho tvaru s jednoduchým zatížením je řešen např. v titulu Fuxa,J.,Adámková L.: „*Sbírka příkladů z pružnosti a pevnosti II, 1.část*“. Výpočet je velmi obsáhlý, a z hlediska obtížnosti aplikace pro kombinované namáhání a následný průhyb nosníku s body maxima a minima napětí je téměř nemožný, proto jsem se uchýlil k použití MKP.

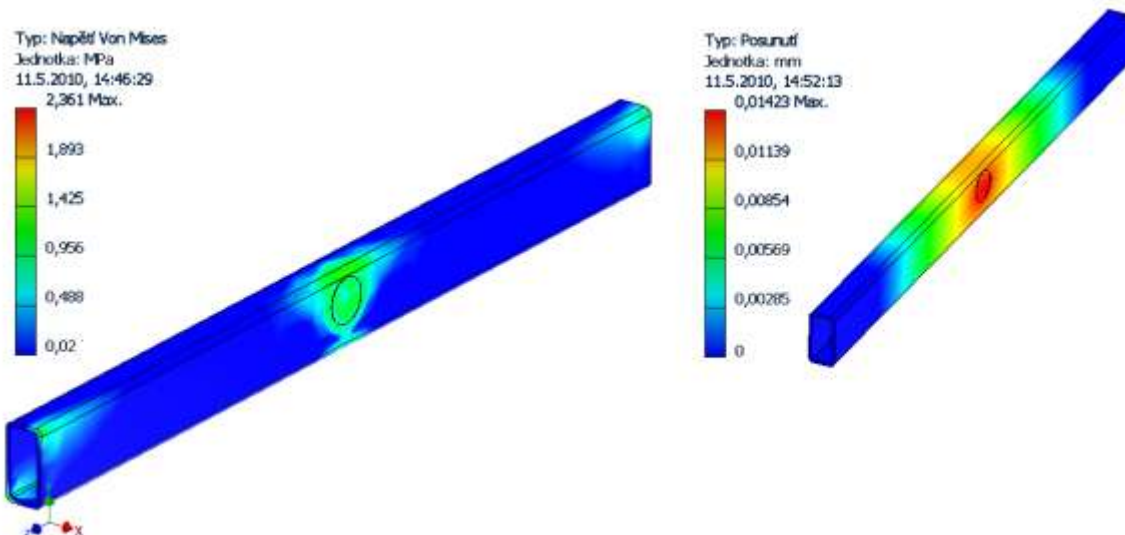
Vstupními parametry pro pevnostní analýzu jsou zatěžující síly a momenty, a jsou umístěny uprostřed nosníku:

$$G_v = 235,4 \text{ N}$$

$$M_{yz} = 22,9 \text{ N.m}$$

$$M_{yy} = 4,2 \text{ N.m}$$

$$F_v = 215,6 \text{ N}$$



Obr. 6.11 MKP analýza nosníku portálu

Maximální posunutí nosníku při plném zrychlení činí 0,015mm, takže jej můžeme bezesporu označit za tuhý portál, a nemusíme mít obavy, že z tohoto místa by vznikaly nepřesnosti řezu. Výpočet metodou MKP konverguje, tím je ověřena správnost.

## 6.7 Určení velikosti mříže – roštu stolu

Rošt stolu má tvar mříže a je vyroben z prutů obdélníkového profilu. Výška profilů je stanovena 50mm a tloušťka 5mm. Na mříž se budou klást plechy do maximálního rozměru 1500x3000x30 mm. Mříž je při práci vždy narušována plazmovým paprskem - řezáním a silně se tímto opotřebovává.

$$\rho_{ocel} = 7800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad [11]$$

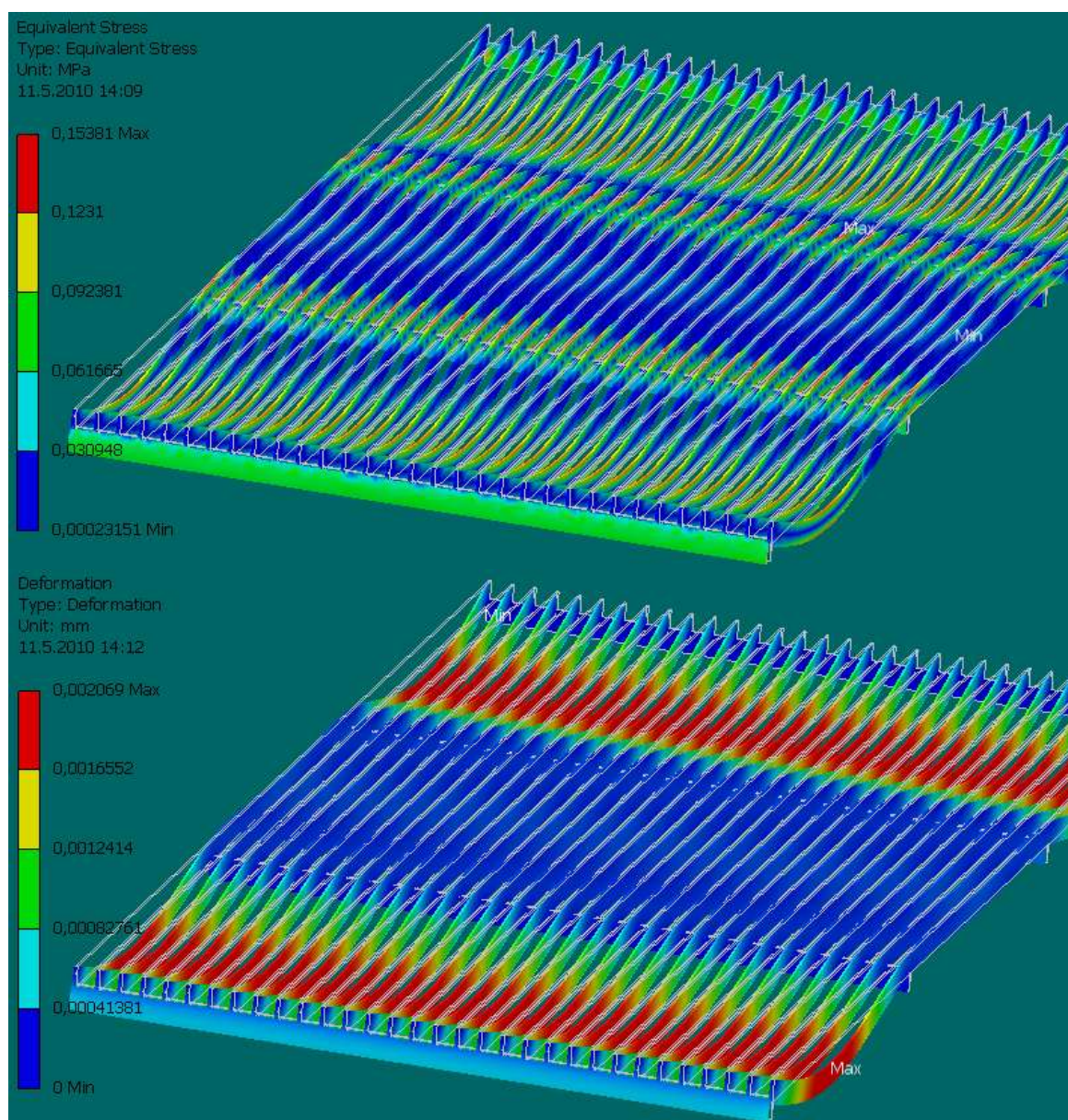
Určení hmotnosti plechu  $m_{\text{plechu}}$  :

$$m_{\text{plechu}} = \rho_{ocel} \cdot V \quad (6.16)$$

$$m_{\text{plechu}} = 7800 \cdot 1,5 \cdot 3 \cdot 0,03$$

$$m_{\text{plechu}} = 1053 \text{ kg}$$

Metodou MKP je ověřena pevnost nosné mříže, výpočet konverguje, tím je potvrzena jeho pravdivost. Mříž je pevnostně silně naddimenzována, ale uživatel se nevyhne její občasné výměně z důvodu propálení a opotřebení.



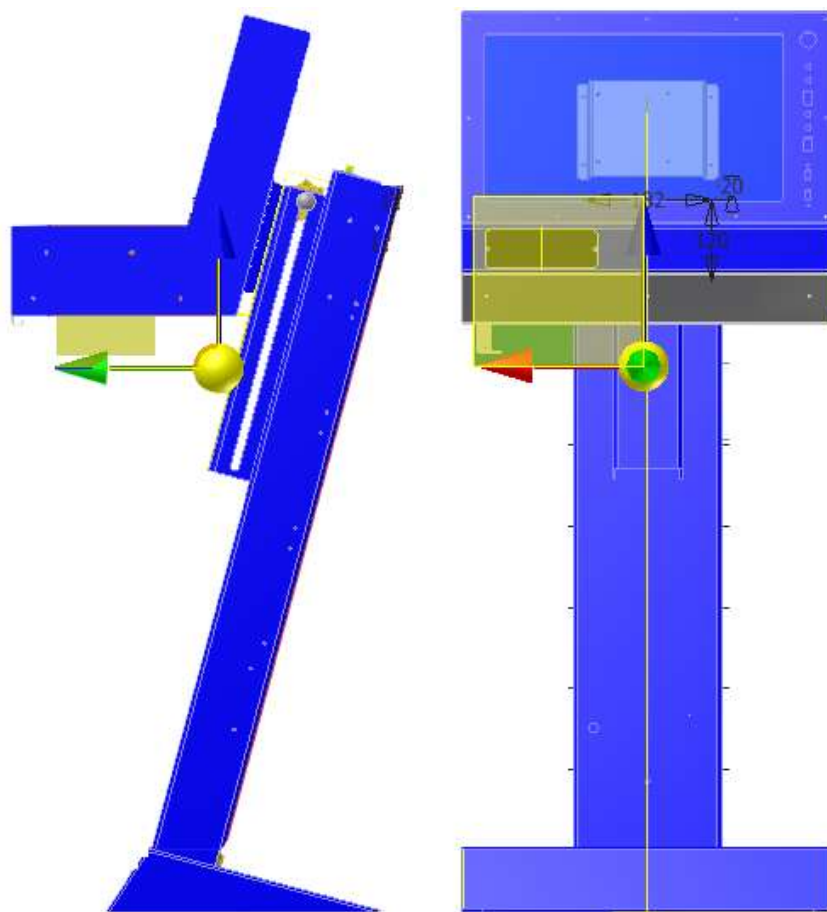
*Obr. 6.12 MKP analýza roštu*

## **6.8 Návrh terminálu**

Terminál je část systému, ve kterém je uložena hlavní řídicí elektronika a osobní počítač s displejem.

Při konstrukci terminálu se bralo ohled na komfort užívání, ergonomii a stabilitu. Na obr. 6.13 je vidět poloha těžiště, a vidíme, že se sestava samo o sobě nepřevrátí.

Stolek je polohovatelný ve svislém směru, obsahuje výsuvnou klávesnici. Je utěsněn proti prachu a je vyroben z plechu tloušťky 3 mm, což mu zajišťuje dostatečnou tuhost.



*Obr. 6.13 Poloha těžiště terminálu*

## **7. Závěr**

Z přehledu možných variant byla vybrána nejvhodnější varianta pro specifikované použití a možnou budoucí rozšiřitelností. Hlavní části stroje tvoří portál, stůl, a terminál. Předmětem návrhu je hlavně portál, který tvoří krokové elektromotory, hřebenové převody s čelními ozubenými koly a lineárními vedeními.

Navržené zařízení je schopno nést plazmový hořák v ose X, Y, Z. Je velmi jednoduché na výrobu, avšak má vyšší nároky na montáž. V ose Z dosahuje hořák zrychlení až  $a_Z=21,9 \text{ m.s}^{-2}$  a v ose X a Y  $a=8 \text{ m.s}^{-2}$ . Lineární vedení a ozubení bylo navrženo pro nejvyšší zátěž, tedy v ose X, a následně použito v osách Y, Z a pevnostně ověřeno.

Zařízení se shoduje s technickými požadavky pro udělení „*Conformité Européenne*“ (značka shody CE). Certifikát bude v nejbližší době vystaven, a zařízení bude připraveno pro testování v provozu.

Kritické části byly pevnostně zkontrolovány a vyhovují.

Cíle této práce jsou splněny.

## **8. Použitá literatura**

- [1] AWAC spol. s r.o.. Michelská 18, Praha. *Internetová prezentace na*  [<www.awac.cz>](http://www.awac.cz).
- [2] ESAB CUTTING SYSTEMS. 411 South Ebenezer Rd., Florence. *Cutting Product Catalog* [on-line].
- [3] FASTCUT CNC. 2841 Bowers Place, Kamloops, Canada. *Machinery catalog*. 2009.
- [4] FLOW. Kent, Washington, USA. *Internetová prezentace na*  [<www.flowcorp.com>](http://www.flowcorp.com).
- [5] HYPERTHERM. Great Hollow Road, Hanover, USA. *Basic Plasma Theory* .2000. 45 s.
- [6] KINETIC CUTTING SYSTEMS INC. Fort Collins, USA. *Internetová prezentace na*  [<www.kineticusa.com>](http://www.kineticusa.com), *oddělení Machines*.
- [7] KLOS,Z. *Bezvlňový pohon s ozubeným hřebenem: diplomová práce*. Ostrava : VŠB-TUO Fakulta strojní, 74 s. 24 příl.
- [8] KREJČÍ, V. *Plazma, čtvrté skupenství hmoty*. Praha : ORBIS, 1974. 247 s. ISBN 505-21-852
- [9] LANDRY CHUCK. Improving Plasma Cutting in Sheet Metal Applications. *MetalForming Magazine*[on-line]. Zář 1997 [cit. 11.května 2001]. Dostupné na WWW:<<http://archieve.metalformingmagazine.com>>.
- [10] LEADSHINE TECHNOLOGY CO.,LTD. 3/F, Block 2, Nanyou Tianan Industrial Park, Nanshan District Shenzhen, China. *Selection Guide for Stepping Motor*. 4 s.
- [11] LEINVERT, J.; ŘASA, J.; VÁVRA, P. *Strojnické tabulky*. Praha : Scientia, 2000. 985 s. ISBN 80-7183-164-6

- [12] MATIS S.R.O. Tuřanka 8, Brno. *Rolnicková vedení, katalog*. 12 s.
- [13] MESSER CUTTING & WELDING GMBH. Gros-Umstadt, Germany. *Image Brochure (3,4MB)*. 2010. 28 s.
- [14] PODEŠVA, J. *Dynamika v příkladech*. Ediční středisko VŠB-TU Ostrava. 2005. 196 s. ISBN 80-7078-678-7
- [15] STIGAL. Nowodworska 17, Legnica, Poland. *Internetová prezentace na <www.stigal.pl>*.
- [16] VERLAG DASHOFER. Na Příkopě 18, Praha . *Lexikon ocelí [CD-ROM]*.

## **9. Seznam příloh**

Kontrola ozubení osy X

Příloha A

Geometrie ozubení osy X a Y

Příloha B

Kontrola ozubení osy Y

Příloha C

Kontrola ozubení osy Z

Příloha D

Geometrie ozubení osy Z

Příloha E

Další přílohu tvoří vybraná výkresová dokumentace a CD-ROM.